

# 오염부지 특성평가를 위한 탐사식 조사기법의 적용 연구

고경석<sup>1)\*</sup> · 김창렬 · 전치완 · 오인숙

## 1. 서언

부지오염 평가는 모든 정화복원처리과정의 첫 단계로서 토양오염의 처리에 정확한 의사 결정을 이끌어내는 매우 결정적이고 중요한 과정으로 이를 통하여 효율적인 복원계획을 수립하고 나아가 토양오염의 확산을 방지할 수 있다. 토양오염의 확산은 자연환경 파괴 등의 문제로 이해관계가 첨예하게 대립하는 지역주민과의 충돌 등을 유발하여 사회적인 문제를 낳고 있다. 국민들도 인식의 변화로 인해 토양 오염이 확산되는 것을 방지하여야 된다는 것에 공감대를 가지고 있다. 토양오염은 지하수와 지표수의 이차 오염으로 이어져 국민들은 물을 안전하게 마실 수 없게 되고 따라서 수자원이 고갈되는 결과를 초래하게 된다.

탐사식 오염부지 평가기술을 개발하기 위해서는 오염부지의 지질특성별 환경을 고려한 토양가스 특성, 자연저감, 지구물리탐사, 지화학 및 지구통계 기법을 통합한 최적오염 탐지기술인 부지오염 탐지 기술을 개발하여 오염부지의 효율적인 관리 및 복원처리를 하여야 한다. 오염부지의 지질환경별 부지 오염 탐지기술의 개발은 토양 오염의 확산을 방지하는 보다 근본적인 대책이 될 수 있을 것이다. 탐사식 부지 평가 기술의 개발을 통하여 오염되지 않은 토양의 보존, 오염확산 방지 및 정화대책을 수립할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 탐사식 조사기법을 이용한 오염탐지 기술에 대하여 오염부지인 매립지, 유류오염부지 특성별로 현장 시험과 조사를 수행하여 탐사식 조사기법이 오염부지에 효과적으로 적용되어 오염부지의 특성화에 효과적인 조사법이 될 수 있는지에 대한 적용성 평가를 수행하였다.

## 2. 지하수 시료 채취 및 분석

오염부지에 대한 탐사식 조사기법을 적용하기 위하여 토양가스, 수리지화학, 미생물 발광균 주 및 물리탐사 기술을 이용하여 오염부지의 지층 특성과 오염 이동 경로 그리고 오염에 따른 지층의 지화학 환경 변화를 추적하여 향후 오염의 확산을 방지하는 대책을 수립하고자 하였다. 토양가스 조사는 능동식 조사법을 이용하여 매립장에 대한 토양가스의 분포와 매립 범위에 대한 특징을 살펴보았으며 베리오그램 분석 등을 통한 지구통계 분석 연구를 수행하였다. S 유류오염부지에서 발생하는 토양오염에 대하여 토양가스 및 물리탐사 등의 방법을 이용하여 조사를 수행하여 기존 조사 자료들과 비교 분석을 하였다. 물리탐사는 매립장과 유류오염부지에 대하여 GPR과 전기비저항 탐사를 수행하여 오염물질의 이동경로 및 지층 특성을 확인하였다. 지화학성분을 이용한 오염환경의 변화에 대한 측정을 위하여 K매립장과 S 매립장에 대한 현장 수질분석과 실내 분석을 수행하여 오염물질의 유출 및 이동에 대하여 확인하였다.

## 3. 연구 결과

### 3.1. 토양가스를 이용한 오염탐지기술

토양가스를 이용한 오염탐지기술 적용을 위하여 K 매립장에서 능동적 가스 채취방법인 AMS사의 토양가스 채취 장비를 이용하여 가스를 채집하고 농도를 IR 가스 측정기를 이용하여 이산화탄소, 메탄, 산소 등을 측정하였다. 가스 측정 방법은 약 80-100cm 하부에 삽입된

1) 한국지질자원연구원 지하수지열연구부 (e-mail: kyungsok@kigam.re.kr)

토양가스 채취장비의 스크린 구간을 통하여 매립가스가 채취되어 측정되었다. 토양가스의 측정은 IR 가스 측정기의 펌프를 통하여 가스가 1-2분 정도 채취된 후 안정된 값을 보여준 후 매립가스의 농도를 측정하였다. 토양 매립가스 성분에 대한 실험(experimental) 및 이론(theoretical) 반베리오그램(semivariogram)을 계산하기 위하여 Surfer 8.0 소프트웨어를 사용하였다(Golden Software, 2002). 베리오그램 모델링 결과는 토양가스 각 성분별로 즉 메탄(CH<sub>4</sub>), 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 산소(O<sub>2</sub>), 질소(N<sub>2</sub>) 각각의 베리오그램 모델을 계산하였다. 베리오그램이 의미를 가지는 영역(range) 값이 성분별로 CO<sub>2</sub> 35.7, O<sub>2</sub> 128.5, CH<sub>4</sub> 157.3, N<sub>2</sub>는 227m의 값을 가짐을 알 수 있었다. 베리오그램 모델링 결과로부터 성분별 베리오그램은 크게 산소는 구형(spherical) 모델에 적합하며 나머지는 모두 지수함수(exponential) 모델로 나뉘어짐을 알 수 있었다. 이방성은 남북방향이 길고 대체로 1:2의 비율을 가지며 각도는 90-112°의 값을 가짐을 확인할 수 있었다.

매립가스 각 성분별로 베리오그램을 살펴보면 CH<sub>4</sub>는 92°의 방향성을 가지며 10-15m와 27-32m에서 공동 효과(hole effect)를 가지는 것을 알 수 있었다(그림 4). 이산화탄소의 경우 메탄과 같이 실험 영역내에서 지속적으로 증가하는 지수함수가 아닌 어느 거리에 도달하면 일정한 값을 가지는 구형 모델을 가졌다. 이산화탄소 역시 12-17m와 25-30m 사이에 공동 효과를 가지고 있었으나 방향성은 112° 정도로 남북방향의 이방성보다는 약간 다른 특징을 가지고 있었다. 이는 매립이 진행됨에 따라 이산화탄소가 메탄으로 변환되는 기작과 상관성있는 공간분포의 특성과 관련이 있는 것으로 판단된다. 크리깅(kriging) 기법을 이용한 단순 공간분석과 공간내의 방향성을 고려한 반베리오그램 모델 결과를 반영하여 계산한 크리깅 결과를 비교하여 보면 메탄의 경우 약간 다른 특징을 보여줌을 알 수 있었다. 단순크리깅을 이용하였을 경우 한 포인트의 위치에 크게 영향을 받아 국부적으로 높은 농도를 나타내는 메탄의 분포를 나타내는 반면 남북방향의 이방성의 영향을 반영한 반베리오그램이 포함된 공간분석의 결과 매립지 중심부분으로 메탄의 분포가 나타나고 매립되지 않은 곳과는 뚜렷하게 차이를 보여줌을 알 수 있었다.

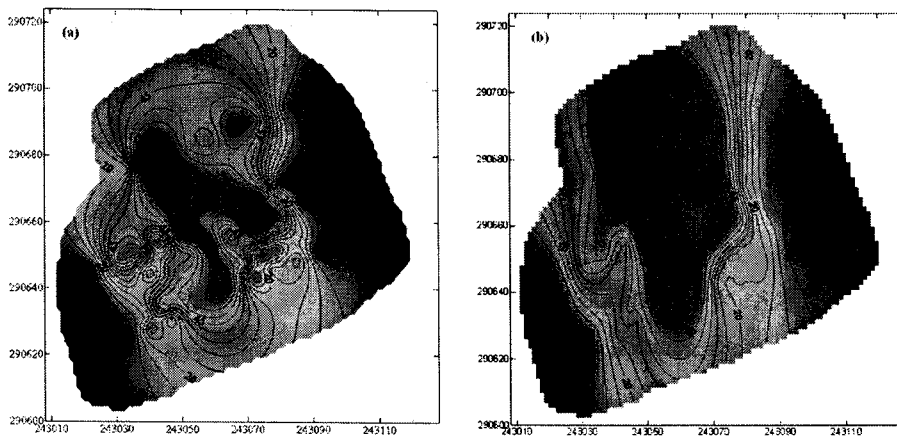


그림 1. 메탄 (a) Simple kriging (b) Kriging using semivariogram.

이산화탄소는 매립가스 발생의 중간단계에서 많이 발생하며 따라서 조사지역에서도 원지반과 가까운 곳의 매립물에서 높은 특징을 보여준다. 단순크리깅과 베리오그램의 영향을 반영하는 공간분포를 보면 메탄의 농도가 가장 높은 중심 부분에서 약간 낮은 값을 보여주며 이는 매립지 분해 단계의 과정을 보여주는 것임을 알 수 있다. 베리오그램을 이용한 공간분석 결과는 발생 매립가스의 분포에 대하여 공간적으로 보다 명확한 특성을 보여줌을 알 수 있었다. 이러한 공간분포의 특성은 불균질하게 나타나는 공간분석에 비해 비교적 쓰레기 매립과 분해

상태를 잘 나타내기 때문에 매립장 안정화 설계나 복원시 각 영역별로 효과적으로 쓰레기 처리를 할 수 있는지에 대한 설계 인자를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.2. 오염지시인자 이용한 토양·지하수 오염 탐지 기술

일반적으로 매립지나 유류오염부지의 경우 침출수와 오염성분이 유기물이 매우 많기 때문에 미생물에 의한 생분해 작용이 활발하게 나타난다. 따라서 유기물질이 많은 침출수나 유류 성분 등의 오염물질이 지하수에 의해 이동하게 되면 지하 지층의 환경은 많은 변화를 겪게 된다. 전기전도도 분포에서 볼 수 있는 바와 같이 매립장에서 발생하는 침출수에 의해 신매립지와 구매립지에서 모두 높은 전기전도도를 보여줌을 알 수 있었다. 전기전도도는 높게는 4500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에서 1000 $\mu\text{S}$ 의 값을 보여주었으며 매립장 하부에서 점차 감소되어 하류부에서는 배경지하수 수질의 분포를 보여주었다. 특징적인 것은 앞서 말한 바와 같이 KB-10과 KB-01의 영향으로 주변의 농도가 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. K 매립장에서의 전기전도도의 분포는 실내 분석에서 얻어진 Cl, Na, K와 유사한 특징을 보여준다. 염소이온의 경우 지하수 내에서 대체로 비반응 특성을 보여주기 때문에 오염물질의 확산을 나타내는데 결정적인 역할을 한다. Cl은 전기전도도와 거의 유사한 양상을 보여주며 침출수의 이동을 직접적으로 나타낸다고 볼 수 있다. K와 Na의 분포 특성은 침출수의 영향을 받아 전기전도도와 유사하지만 양이온교환 반응의 효과에 따라 오염지하수에서는 약간 다른 양상이 나타남을 또한 확인할 수 있었다. 중탄산염의 경우 침출수의 영향에 따라 증가하는 양상을 보여주었다. 그러나 중탄산염의 경우 침출수의 물질내 유기오염물질이 많고 적음에 따라 양상이 달라지기 때문에 정확하게 그 양상을 유추하기는 어렵다. 하지만 중탄산염의 증가는 유기물질의 미생물 분해에 의해 증가되어지기 때문에 자연정화와 관련된 인자로서 매우 중요한 오염 지시인자로 이용될 수 있다.

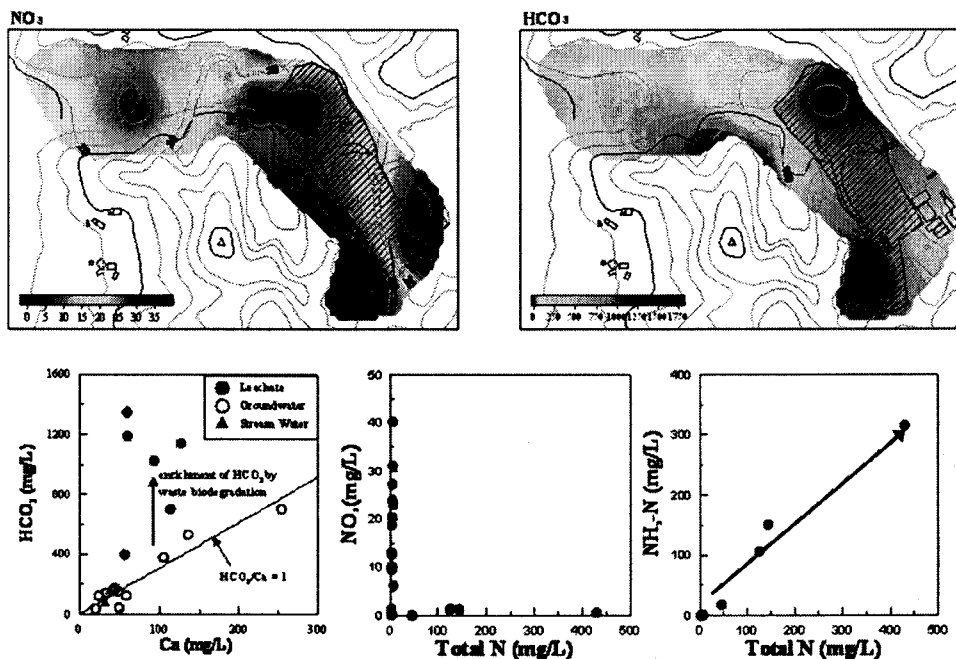


그림 2. 매립장에서의 오염지시인자의 특성.

### 3.3. 물리탐사를 이용한 오염부지 탐사

쓰레기 매립장의 특성을 파악하기 위하여 매립장 및 매립장 주변지역에 대하여 전자탐사

및 자력탐사를 적용하였다. 자력탐사의 결과 쓰레기 매립장의 경계를 구분할 수 있었으며, 전자탐사의 경우에는 매립장 주변의 전기비저항의 분포를 손쉽게 조사할 수 있는 장점으로 인하여 침출수로 인한 천부 오염상황을 추정할 수 있었다. 전자탐사의 결과 매립지 주변의 전기비저항은 매립지와 북쪽방향의 절토지에서 매우 낮은 전기비저항 값을 보여주는데 이는 침출수의 유출로 인한 오염으로 인한 것으로 파악되었다. 하부의 논에서는 지표면의 전기비저항이 비교적 높게 나타나 침출수로 인한 오염이 비교적 덜 한 것으로 판단되었다. 전자탐사의 결과 상에서 침출수의 오염경로는 매립장의 북쪽방향으로 진행하였을 것으로 해석되었다. 다만, 전자탐사의 자료는 탐사기 운용상의 문제점으로 인하여 고주파수 자료만이 활용되어 천부 해석에 제한되는 한계점도 나타나 향후 이의 해결을 위한 지속적인 연구가 필요할 것으로 생각된다. 두 조사기법은 매립지의 규모나 오염파악의 목적으로 단 시간에 매우 넓은 지역에 대한 조사가 가능하다는 장점으로 인하여 환경오염분야에 적극적으로 활용될 것으로 기대된다. 그림 3은 K 매립지와 D 유류오염부지에서의 3차원 전기비저항 탐사결과를 보여주는 것으로 오염물질의 유동경로를 보여주는 것이다.

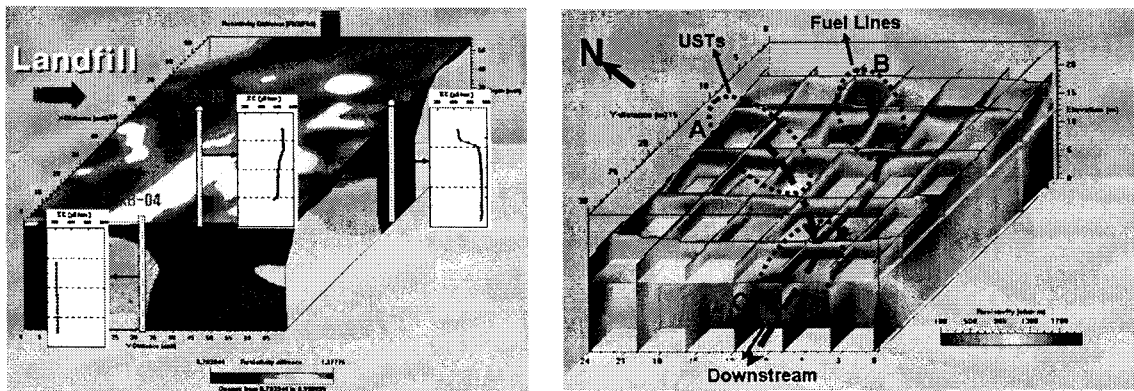


그림 3. 매립지와 유류오염부지의 물리탐사 결과.

#### 사사

본 연구는 환경부 토양오염확산방지사업인 "탐사식 조사기법을 이용한 오염부지 현장평가 프로토콜 개발"의 연구비지원으로 수행되었습니다.